

6 자유도 자전거 시뮬레이터의 운동 장치 제어력을 이용한 운전자의 작용력 추정

Estimation of Rider's Action Force from Measurement of Motion Platform Control Force in the 6 DOF Bicycle Simulator

신재철* · 이종원**

Jae-Cheol Shin and Chong-Won Lee

Key Words : Bicycle Simulator(자전거 시뮬레이터), Motion Platform(운동 장치), Force Estimation(힘 추정), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어)

ABSTRACT

One of the challenging problems with bicycle simulators is to deal with the inherent unstable bicycle dynamics that is coupled with rider's motion. For the bicycle dynamics calculation and the real time simulation, it is necessary to identify the control inputs from the rider as well as the virtual environments. The six control forces of the Stewart platform-based motion system are used for estimation of the rider's action force, which is one of the important control inputs, but of which the direct measurement is impractical. For the effective estimation of the rider's action force, the dynamics model of the motion system is derived incorporated with both analytical and experimental methods and the sliding mode controller with perturbation estimation is developed.

1. 서 론

자동차, 항공기, 헬리콥터, 탱크, 배 시뮬레이터 등 다양한 종류의 시뮬레이터가 개발되어 새로운 디자인에 대한 테스트, 환경 평가, 운전 교습, 오락 등 여러 가지 용도로 사용되고 있다. 그러나 인간이 동력원이 되면서, 두 개의 바퀴를 가지는 자전거와 관련된 시뮬레이터 연구는 소수에 지나지 않았다. 브로간은 올림픽 자전거 경기 환경을 근거로 그래픽 위주의 자전거 시뮬레이터를 개발하였고[1], 싱가포르의 난양기술대학교(NTU)에서는 6 자유도 스투워드 플랫폼을 운동 장치로 쓰는 자전거 시뮬레이터를 개발하였다[2]. 또 한국과학기술원(KAIST)에서도 네트워크를 이용한 경주용 자전거 시뮬레이터를 개발하였다[3]. 그 외에도 몇 가지 개발 사례들이 발표되었는데, 자전거 시뮬레이터에 관한 연구에서 가장 흥미를 끄는 요소 중의 하나가 운전자의 움직임과 관련된 자전거 동역학을 다루는 것이다. 자전거 동역학

계산과 시뮬레이터에서의 실시간 시뮬레이션을 위해서는 가상환경 정보뿐만 아니라 운전자로부터의 입력이 적절히 규명되어야 한다. 지면 형상과 지면 상태 등의 가상환경 조건들은 시각 시스템에 의해서 재생되고 또 제공되기 때문에 동역학에 필요한 입력들을 쉽게 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 자전거의 진행 방향을 조절하는 조향 토크와 자전거의 가감속을 조절하는 페달 토크와 제동 토크는 각 부분에 토크 센서를 부착하여 쉽게 그 값의 측정이 가능하다. 그러나, 자전거 운동에 많은 영향을 끼치는 운전자의 몸통의 좌우 기울어짐 효과와 같은 몸체 작용력은 직접적인 측정이 매우 어렵다. 따라서 KAIST 자전거 시뮬레이터를 대상으로 하여 본 연구에서는 시뮬레이터의 운동 장치로 사용하는 스투워드 플랫폼의 각 축 제어력을 이용하여 운전자에 의해서 가해진 몸체 작용력을 추정하고자 한다. 이를 위해서 운동 장치로 사용되었던 중력 보상용 스프링을 부착한 스투워드 플랫폼의 동역학을 해석적 방법과 실험적 방법을 병행하여 구하였다. 또 플랫폼이 외란에 대해서 강건한 제어 특성을 가지며 또 그 외란을 예측하기 위하여 외란 추정기를 가지는 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 이를 통해서 저주파 추종 오차를 최소화할 수 있으며, 운전자 몸체 작용력도 잘 예측할 수 있다.

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : jcshin@novic.kaist.ac.kr
Tel : (042)869-3056, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 시스템 구성

2.1 KAIST 자전거 시뮬레이터 개략[4]

KAIST 자전거 시뮬레이터는 운동 느낌 생성을 위한 중력 보상용 스프링 시스템을 가진 6 자유도 스텐드 플랫폼과 핸들과 페달에서의 작용력과 저항력을 통한 느낌 재현을 위한 햅틱 시스템, 시각 정보를 제공하기 위한 시각 재현 시스템, 3차원 음장 재현을 위한 음향 시스템 등으로 구성된다. 그림 1은 KAIST 자전거 시뮬레이터의 모션 시스템과 햅틱 시스템이며, 스텐드 플랫폼 상판에 고정된 좌표계는 자전거의 진행 방향이 x 방향, 상부 방향이 z 방향이며, y 방향은 오른손 법칙에 의해서 정해지는 방향으로 자전거의 좌우 방향에 해당한다. 시뮬레이터 운전자는 스텐드 플랫폼 위에 부착된 자전거 시스템을 타고 시뮬레이터를 조정한다. 이 때 실제 자전거 운전시와 같이 균형과 방향 조절을 위해서 몸체를 좌우로 기울이게 된다. 결국 그러한 운전자의 작용력이 플랫폼의 제어력에 영향을 끼치게 된다.

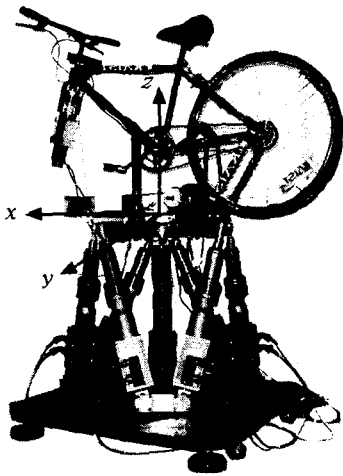


Fig. 1 KAIST 자전거 시뮬레이터

2.2 운동 장치 하드웨어와 소프트웨어 구성

운동 장치의 하드웨어는 스텐드 플랫폼과 제어 시스템으로 구성된다. 스텐드 플랫폼은 상하판, 6개의 직선운동 액추에이터, 스프링 시스템으로 구성된다. 각 액추에이터는 200W의 AC 서보모터와 리드 25mm의 볼스크류 시스템으로 이루어지는데, 모터에는 3000 펄스의 엔코더가 부착되어 제어시 모터의 회전 각도를 알 수 있다. 직선 운동시 액추에이터는 240N의 정격힘과 720N의 최대력을 발생시킨다. 그런데, 이와 같은 용량의 액추에이터를 갖는 스텐드 플랫폼은 자전거 시뮬레이터용 운동 장치로 사용하기에는 그 용량

이 부족하기 때문에 스프링 상수 691N/m를 갖는 스프링 시스템을 상하판 사이에 부착하여 플랫폼이 중립 위치에 있을 때 약 40kgf 정도의 정하중을 보살할 수 있도록 하여 스텐드 플랫폼의 용량을 증가시켰다.

스튜어트 플랫폼을 제어하기 위한 시스템은 CPU 750MHz의 개인용 컴퓨터(PC)와 12 비트 D/A 보드, 4개의 채널을 갖는 24 비트 업-다운(up-down) 카운터 보드 2개, 확장보드와 컴퓨터간의 연결을 위한 16 비트 ISA 확장 슬롯으로 구성된다. PC에서 제어 법칙에 따라 계산된 토크 즉 제어 신호는 D/A 보드를 통하여 AC 서보 모터를 구동하는 전기적인 신호로 바뀌게 된다. 업-다운 카운터는 모터의 회전각과 일치하는 엔코더 신호를 계산하여 모터의 회전각을 측정함으로써 액추에이터의 순간 길이를 구할 수 있다.

일반적으로 제어 대상의 모형을 기저로 하는 제어 방법은 매 루프마다 그 시스템의 동역학 계산이 필요하다. 그런데, 스텐드 플랫폼과 같은 병렬 매니플레이터는 수치 해석적인 정기구학(forward kinematics)을 포함하는 동역학이 매우 복잡하기 때문에, 모형을 기저로 하는 제어 시스템 구성시 DSP와 컴퓨터의 멀티프로세서(multi processor)를 사용하였으나, 최근에 급속한 컴퓨터의 발달로 말미암아, PC만을 가지고도 요구 신호 생성, 기구학 및 동역학 계산, 데이터 입출력 및 교환 등의 일련의 제어과정을 샘플링 주기 1 ms 이내로 가능하게 하였다. 본 연구에서도 PC만을 프로세서로 사용하는 제어 시스템을 구축하여 동역학을 포함하는 모든 제어 과정을 매 루프마다 실시간 계산하게 하였다. 또 그 운영 체제는 실시간 운영체제인 QNX를 사용하였다. 이는 주기적 타이머(periodic timer)를 제공하여 제어시에 귀한 루프 시간을 정확하게 조절할 수 있다.

3. 시스템 모형화

3.1 운동 장치의 동역학 모형화

근래까지 병렬 매니플레이터의 기구학 해석에 대한 광범위한 연구가 행해졌음에 반해 동역학에 대한 연구는 시스템에 미치는 영향이 일반적으로 직렬 매니플레이터에 비해 작을 뿐 아니라 페루프 구조와 기구학적 구속 등의 복잡성 때문에 상당히 미미한 정도였다. 그러나 최근에 고속, 고정도, 고주파수 운동 등의 요구에 부응하기 위하여 동역학에 대한 연구가 많은 관심을 끌기 시작하여 그동안 뉴턴-오일러 방법, 라그랑지안 방법, 가상 일 원리를 이용한 방법 등이 주로 연구되어 왔다. 최근에는 케인 방법을 이용한 방법도 제안되었다. 그러나, 그 중에서 가상 일의 원리를 이용한 방법이 조인트 공간과 작업 공간 사이의 복잡한 속도 변환 등을 해아 함에도 불구하고, 가장 효율적인 방법으로 알려져 있어 실시간 제어를 위한 연구에서 많이 사용되고 있다[5].

본 연구에서는 시스템의 모형을 기반으로 하는 제어기 설계를 위하여, 스프링 시스템을 포함하는 스텐드 플랫폼

의 동역학 모형화는 해석적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 유도하였다. 해석적 유도에 있어서 컴퓨터의 계산 효율을 높이기 위하여 가상 일의 원리가 사용하였다. 그 과정에 있어서 형식화 특이성(formulation singularity)을 피하기 위하여 액추에이터의 좌표계와 스프링 시스템의 좌표계를 달리 사용하였다. 액추에이터의 쿨롱 마찰계수, 비례 댐핑계수와 같은 동역학적 상수, 자전거 시스템의 질량 관성 모멘트 등은 실험적인 방법에 의해서 얻어졌다.

(1) 액추에이터의 동역학 모형화

앞서 언급한 바와 같이 액추에이터 시스템은 AC 서보 모터와 볼 스크류로 구성되기 때문에 부하 조건 등의 작동 환경에 따라서 마찰력과 댐핑력이 달라지는 등 액추에이터의 내부 동특성이 매우 복잡하지만, 여기서는 가장 중요한 요소만을 고려하여 액추에이터를 간단히 모형화하고자 한다. 액추에이터를 구성하는 각 부분의 유연성을 무시한다는 가정 하에 액추에이터 동역학을 다음과 같이 모형화하였다.

$$\tau_a = m_{eq}\ddot{l} + c_{a,1}\dot{l} + c_{a,2}\text{sgn}(\dot{l}) + \tau_r \quad (1)$$

위의 식에서 왼쪽 τ_a 는 액추에이터만을 구동하기 위한 토크이다. 또, 오른쪽 첫 번째 항은 관성력을 나타내고, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 비례 댐핑력과 쿨롱 마찰력을 나타낸다. 그리고 마지막 항은 모터의 토크 리플(torque ripple)을 비롯한 모형화되지 않은 부분과 모형화시의 오차를 나타낸다. m_{eq} 는 액추에이터 내부의 움직이는 부분에 대한 등가질량으로 액추에이터를 구성하는 제품의 사양 등을 통해서 쉽게 그 값, 10.8kg을 구할 수 있다. $c_{a,1}$ 과 $c_{a,2}$ 를 구하기 위하여 5초의 주기를 가지는 삼각파를 6개의 액추에이터의 요구 신호로 사용하여 그 신호의 크기를 여러 가지로 변화시켰을 때 입력되는 제어력을 관찰하였다. 이때 액추에이터의 오차 신호는 매우 작아 무시할 만 하다. 그런데 여기서 주어지는 요구 신호의 크기가 매우 작고, 정상 상태에서 그 가속도가 영이기 때문에 시스템 관성력은 무시할 수 있다. 그림 2는 실제 자전거 시뮬레이터 구동시와 비슷한 환경을 제공하기 위해서 스투위트 플랫폼 위에 대략적으로 운전자와 자전거 시스템의 질량을 합한 정도인 85kg을 올려놓고 액추에이터가 속도 $\pm 0.006\text{m/s}$ 를 가질 때의 액추에이터 1과 2의 제어력을 나타낸다. 그림에서 0초부터 2.5초까지가 액추에이터의 길이가 길어지는 방향 즉, 플랫폼이 +2방향으로 움직일 때이고, 2.5초부터 5초까지가 액추에이터 길이가 짧아지는 방향 즉 플랫폼이 -2방향으로 움직일 때이다. 그림 3에서 각 점은 각각의 속도에서 6개 액추에이터의 평균 제어력을 나타내고, 실선은 그 점들에 대한 선형 커브피팅을 나타낸다. 여기에서 속력이 0일 때 두 실선이 세로축과 만날 때 그 값들의 차이의 반이 쿨롱 마찰 계수(c_{a1})로서 그 값은 29.6N이고, 또 실선의 기울기가 비례 댐핑 계수(c_{a2})를 나타내는 것으로 그 값은 액추에이터의 길이가 길어질 때는

1685Ns/m이고, 액추에이터 길이가 짧아질 때는 1603Ns/m이다.

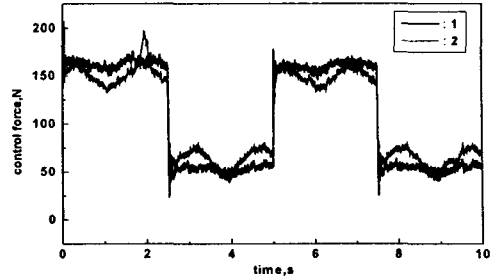


Fig. 2 액추에이터의 제어력

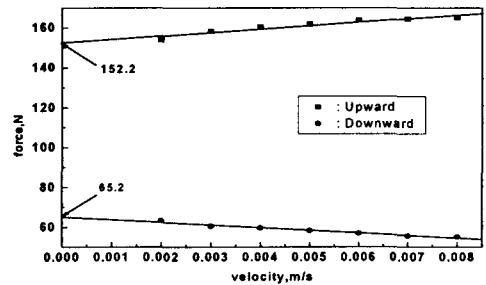


Fig. 3 액추에이터 속력에 따른 평균 제어력

(2) 스프링 지지를 포함한 스투위트 플랫폼의 동역학 모형화

스프링 지지를 포함한 스투위트 플랫폼의 동역학을 유도하기 위하여 가상 일의 원리를 이용하면, 스투위트 플랫폼에서 가상 시간 δt 동안 모든 힘과 토크에 의한 가상 일의 총합은 0이 된다. 이로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\tau_r = -\left[\mathbf{J}_r^T \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^6 \left\{ \sum_{j=1}^2 \left(\left[{}^k \mathbf{H}_{p,ij} \right]^T {}^k \mathbf{R}_{ij} \right) + \left[{}^k \mathbf{G}_i \right]^T {}^k \mathbf{T}_i \right\} \right] - \left[\mathbf{J}_r^T \right]^{-1} \left[\mathbf{J}_s^T \mathbf{f}_s + \sum_{j=1}^2 \left(\left[{}^k \mathbf{H}_{s,ij} \right]^T {}^k \mathbf{R}_{ij} \right) + \left[{}^k \mathbf{G}_s \right]^T {}^k \mathbf{T}_s \right] \quad (2)$$

τ_r : 액추에이터 동역학을 제외한 스투위트 플랫폼 구동 토크

$\mathbf{J}_p, \mathbf{J}_s$: 각각 $6 \times 6, 6 \times 1$ 의 스투위트 플랫폼의 자코비언 행렬과 스프링 시스템의 자코비언 행렬

${}^k \mathbf{H}_{p,ij}, {}^k \mathbf{H}_{s,ij}$: 액추에이터와 스프링 시스템에 관련된 편속도 행렬

${}^k \mathbf{G}_i, {}^k \mathbf{G}_s$: 액추에이터와 스프링 시스템에 관련된 편각속도 행렬

${}^k \mathbf{R}_{ij}, {}^k \mathbf{R}_{sj}$: 액추에이터와 스프링 시스템에 관한 힘 벡터

${}^k\mathbf{T}_r$, ${}^k\mathbf{T}_s$: 액추에이터와 스프링 시스템에 관한 토크 벡터
 f_s : 스프링 힘

위의 식(2)는 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau}_r = \mathbf{M}_p(\ddot{\mathbf{X}}) + \mathbf{V}_p(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{G}_p(\mathbf{X}) + \mathbf{F}_s(\mathbf{X}) \quad (3)$$

여기에서 $\mathbf{M}_p \in R^{6 \times 6}$ 는 액추에이터 길이 좌표계에 관한 스튜워트 플랫폼의 관성질량행렬로서 대칭행렬이며, 비특이행렬이다. $\mathbf{V}_p \in R^{6 \times 1}$ 은 원심력과 코리올리 힘 벡터이고, $\mathbf{G}_p \in R^{6 \times 1}$ 는 중력 벡터, $\mathbf{F}_s \in R^{6 \times 1}$ 는 스프링 힘 벡터이다.

4. 모션 시스템의 제어 및 운전자의 작용력 추정

4.1 외란 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기

식(2)와 식(3)을 합하면 액추에이터 동역학을 포함하는 스튜워트 플랫폼의 전체 운동방정식을 구할 수 있는데, 그 식은 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{i}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) + \Delta \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) + [\mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) + \Delta \mathbf{b}(\mathbf{i}(t))] \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}(t). \quad (4)$$

여기에서 $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_a + \boldsymbol{\tau}_r$ 이며, \mathbf{f} 는 비선형 동역학 벡터, \mathbf{b} 는 제어 이득 행렬이다. $\Delta \mathbf{f}$ 와 $\Delta \mathbf{b}$ 는 각각 \mathbf{f} 와 \mathbf{b} 의 모형화 오차 항을 나타낸다. \mathbf{d} 는 시뮬레이터 운전자로부터 스튜워트 플랫폼에 가해지는 외란 항을 나타낸다. 식(4)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{i}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) + \mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau} + \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) \quad (5)$$

여기에서

$$\mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) = \Delta \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) + \Delta \mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}(t). \quad (6)$$

위의 동역학 식(5)는 다음의 식과 같이 모형화 부분 (7a)와 교란 부분 (7b)로 나눌 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{i}}_n(t) = \mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau}_n(t) + \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) \quad (7a)$$

$$\ddot{\mathbf{i}}_p(t) = \mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau}_p(t) + \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) \quad (7b)$$

여기에서 $\boldsymbol{\Phi}(t) = -\mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau}_p(t)$ 라 하면, 식(7b)는 다음과 같이 된다.

$$\ddot{\mathbf{i}}_p(t) = \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) - \boldsymbol{\Phi}(t) \quad (8)$$

\mathbf{P}_E 가 외란 관측기에 의해서 어느 정도 추정 가능하다고 하면, 다음 식과 같이 추정된 부분과 그 외 잔여 항으로 나눌 수 있다.

$$\mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) = \tilde{\mathbf{P}}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) + \Delta \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) \quad (9)$$

여기에서 $\tilde{\mathbf{P}}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t)$ 는 추정된 교란 항이고,

$\Delta \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t)$ 는 잔여 항을 나타낸다.

식(9)를 이용하여, 식(5)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{i}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t)) + \mathbf{b}(\mathbf{i}(t)) \boldsymbol{\tau} + \tilde{\mathbf{P}}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) + \Delta \mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) \quad (10)$$

시스템의 동역학 방정식(10)을 이용하여, 경계층을 갖는 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{b}^{-1}[\dot{\mathbf{i}}_d - \lambda \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{f} - \tilde{\mathbf{P}}_E - \mathbf{K}_r \text{sat}(\mathbf{s}, \mathbf{s}_0)] \quad (11)$$

여기에서 $\dot{\mathbf{i}}_d$ 는 액추에이터 요구 길이 신호이며, $\mathbf{e} = \mathbf{i} - \dot{\mathbf{i}}_d$ 로 나타나는 오차 신호이다. 또 $\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \lambda \mathbf{e}$ 로 정의되는 슬라이딩 평면의 기울기, $\mathbf{K}_r = \text{diag}(k_{r,1}, k_{r,2}, \dots, k_{r,n})$ 이다.

위와 같은 제어기를 가진 시스템의 오차 동역학은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{s}_j + \frac{k_{r,j}}{s_{0,j}} s_j = \Delta P_{E,j} \quad (12)$$

위 식을 교란 항을 이용하여 다시 쓰면, 다음과 같다.

$$\ddot{i}_{p,j}(t) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(t) + a_{j2} i_{p,j}(t) = \Delta P_{E,j}(t) \quad (13)$$

여기에서 $a_{j1} = \lambda_j + \frac{k_{r,j}}{s_{0,j}}$ 이고, $a_{j2} = \lambda_j \frac{k_{r,j}}{s_{0,j}}$ 이다.

식(11)에서 설계된 제어기가 안정적으로 잘 작동한다면, $\boldsymbol{\Phi}(t)$ 는 교란 추정기로 사용할 수 있다. $\boldsymbol{\Phi}(t)$ 와 $\mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t)$ 는 저주파 성분뿐만 아니라, 고주파 성분도 포함하기 때문에, $\boldsymbol{\Phi}(t)$ 를 사용하여 $\mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t)$ 의 고주파 성분을 정확하게 추정하기는 거의 불가능하다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 간단한 방법으로 저주파 통과 필터를 생각할 수 있다. 만약에 $\mathbf{P}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t)$ 의 추정기로서 저주파 통과 필터된 $\hat{\boldsymbol{\Phi}}(t)$ 를 사용한다면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{P}}_E(\mathbf{i}(t), \dot{\mathbf{i}}(t), t) = \hat{\boldsymbol{\Phi}}(t) \quad (14)$$

식(9), (13), (14)를 사용하여, 다음과 같은 관계식을 이끌어 낼 수 있다.

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_j(t) - \boldsymbol{\Phi}_j(t) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(t) + a_{j2} i_{p,j}(t) = 0 \quad (15)$$

그리고 $\hat{\boldsymbol{\Phi}}_j(t)$ 와 $\boldsymbol{\Phi}_j(t)$ 는 $\hat{\boldsymbol{\Phi}}_j(t) + \omega_{n,j} \hat{\boldsymbol{\Phi}}_j(t) = \omega_{n,j} \boldsymbol{\Phi}_j(t)$ 의 관계를 가지기 때문에 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_j = k_{p,j} \lambda_j e_j + k_{p,j} h_j \int_{t_0}^t s_j dt \quad (16)$$

여기에서 $\omega_{n,j}$ 는 저주파 통과 필터의 절점 주파수이고,

$$k_{p,j} = \omega_{n,j} \text{ 과 } h_j = \frac{k_{r,j}}{s_{0,j}} \text{의 관계식을 갖는다.}$$

4.2 운전자의 작용력 추정

$\hat{\phi}_j$ 는 각 액추에이터에서 추정된 교란으로 생각할 수 있는데, 만약에 시스템의 모형화 오차, Δf 와 Δb 가 시뮬레이터 운전자의 거동에 의한 외란에 비하여 매우 작아 그 값을 무시할 수 있다면, 운전자의 몸체 작용력, F 는 $\hat{\phi}_j$ 로부터 그 추정이 가능하며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$F = b^{-1} [J^T]^{-1} \hat{\phi} \quad (17)$$

여기에서 $F = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$ 인데, 자전거 시뮬레이터 동역학을 위해서는 자전거의 좌우 기울어짐 모멘트로 작용하는 M_x 가 가장 중요한 인자가 된다.

5. 실험 결과

그림 4는 스튜어트 플랫폼의 제어 흐름도를 보여준다. 작업 공간의 좌표계로 주어지는 요구신호(X_d)는 역기구학을 통하여 액추에이터 좌표계의 요구신호(L_d)로 변환된다. 한편으로 카운터 보드를 통하여 계산된 액추에이터 길이(l)를 이용하여 정기구학 및 플랫폼의 동역학을 계산하게 된다. 이렇게 계산된 관성행렬(M), 원심력 및 코리올리 벡터(V), 중력 벡터(G) 등과 오차신호는 슬라이딩 모드 제어 법칙에 사용된다. 계산된 제어 신호는 D/A 보드를 통하여 각 모터의 드라이버를 구동하게 된다. 이 과정에서 제어기는 플랫폼의 제어뿐만 아니라, 외란 관측 기능을 담당하게 된다.

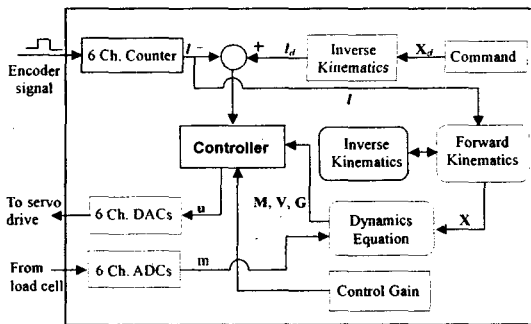


Fig. 4 스튜어트 플랫폼의 제어 흐름도

자전거 시뮬레이터 운전시 몸체 작용력 추정에 관한 실험을 위해서 다음과 같은 조건을 설정하였다. 제어시 요구신호는 $x = 0.005(1 - e^{-10t})\sin(2\pi t)$ m이고, z 는 중립위치, 나머지 방향은 0으로 인가하였다. 그리고 운전자에 의한 외란은

$M_x = 100 \sin(1.2\pi t)$ Nm만 들어오고, 나머지 외란 항은 0이다. 실험시 사용된 제어기는 식(11)과 같고, 각 제어 인자는 다음과 같다.

$$\lambda_j = 60 \text{ rad/s, } s_{0,k} = 0.075 \text{ m/s, } k_{r,j} = 57 \text{ N, } k_{p,j} = 57 \text{ N.}$$

그림 5는 x, y, z 의 직선 방향의 오차와 롤, 피치, 요의 회전 방향의 오차를 나타낸다. 모든 직선 방향 오차는 0.1mm 이하이며 회전 방향에 대해서도 0.003rad 이하의 매우 작은 추종오차를 갖는다. 그런데 롤 방향의 오차가 다른 회전 방향의 오차보다 크게 나타나는데, 이것은 롤 방향의 외란 성분을 인가하였기 때문이다. 그러나 시뮬레이터의 운동 장치로 사용하기에는 충분히 작은 오차를 가지고 요구 신호를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

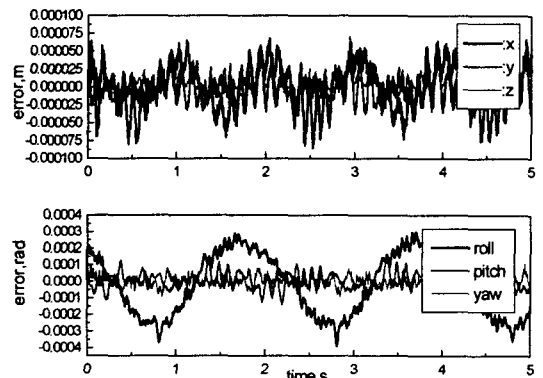


Fig. 5 각 방향의 오차 신호

그림 6는 액추에이터 1과 2에 대한 슬라이딩 함수 s_1 과 s_2 값을 보여준다. 이를 포함한 모든 슬라이딩 함수가 경계층 $s_{0,k} = 0.075 \text{ m/s}$ 내에 존재함으로써 식(16)이 성립하여 외란 관측이 가능하다.

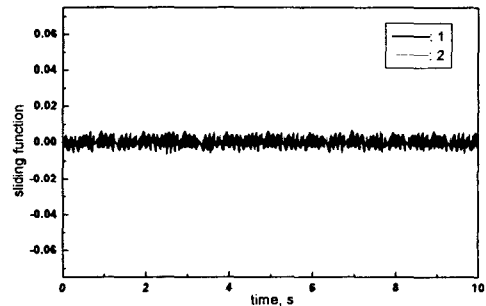


Fig. 6 액추에이터 1, 2에 대한 슬라이딩 함수

그림 7은 외란 관측기에 의해서 추정된 각 방향의 선형 힘으로 x 방향으로 최대 약 60N, y 방향으로 최대 약 20N, z 방향으로 최대 약 100N 정도의 오차를 발생시키는데, 이는 스튜어트 플랫폼의 모형화 오차 등에서 비롯된 것이다. 그러

나 여기에서 고려해야 할 점은 실제로 자전거 시뮬레이터 구현시 자전거 동역학에서 선형 힘은 고려되지 않는다. 그림 8는 각 방향으로 추정된 회전 모멘트를 보여 주는 것으로 피치 방향으로의 최대 약 25Nm 정도의 오차를 유발하며, 요 방향으로의 거의 오차를 발생시키지 않는다. 그림 9는 주어진 롤 방향의 모멘트와 추정기를 통해서 예측된 롤 모멘트를 나타내는 것으로 추정기에 의한 위상지연으로 인하여, 약 25Nm정도의 오차를 유발시킨다. 그러나 이러한 최대 0.12초 정도의 위상지연은 시뮬레이터 운전자에 의해서 감지되는 정도는 아닌 것으로 판단된다. 결과적으로 이러한 외란 추정기를 통해서 운전자의 몸체 작용력을 자전거 시뮬레이터에 적용이 가능하다.

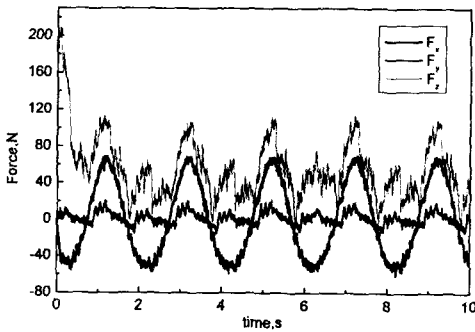


Fig. 7 관측된 선형힘

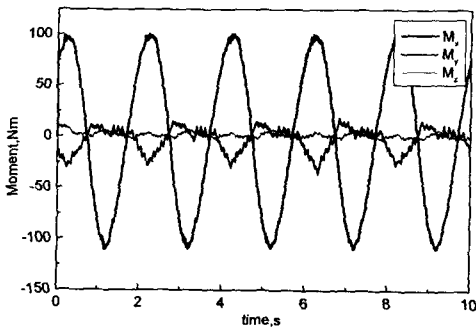


Fig. 8 관측된 회전모멘트

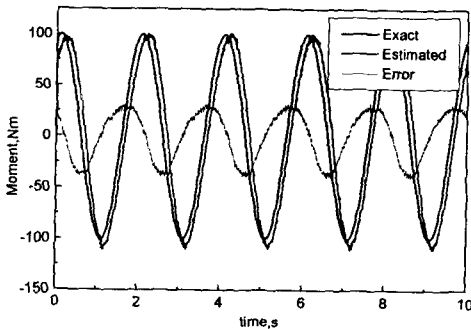


Fig. 9 실제 외란과 관측된 외란의 비교

6. 결론

자전거 주행시 운전자의 몸체 작용력이 자전거 운동에 큰 영향을 끼친다. 자전거 시뮬레이터 구성시 이러한 몸체 작용력을 규명하기 위하여, 시뮬레이터의 운동 장치인 스튜워트 플랫폼의 제어력을 이용하였다. 이를 위하여, 자전거 시스템을 포함하는 모션 시스템의 동역학을 가상 일의 원리를 사용한 해석적인 방법과 액추에이터의 동특성을 파악하기 위한 실험적인 방법을 병행하여 유도하였다. 또한 모션 시스템의 제어와 운전자 몸체 작용력 추정을 위하여 실시간 (real-time) OS인 QNX 환경하에서 외란 관측기를 가지는 슬라이딩 모드 제어를 사용하였다. 이를 사용하여 운전자의 몸체 작용력을 대신하는 임의의 외란을 인가한 상태에서 시스템을 제어한 결과, 자전거 시뮬레이터로 충분히 적용이 가능하도록 하는 외란 관측 및 제어 성능을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 가상현실 연구 센터내 연구과제로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) D. C. Brogan, R. A. Metoyer and J. K. Hodgins, "Dynamically Simulated Characters in Virtual Environments," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, p58~69, 1998.
- (2) www.drc.ntu.edu.sg/groups/drc_www/projects_vr/bicycle_simulator/enter.epl
- (3) 이경노 외, "네트워크에 기반한 자전거 경주 시뮬레이터," HCI 2002, 강원도, 한국, 2002.
- (4) D. S. Kwon, G. H. Yang, C. W. Lee, J. C. Shin and et al., "KAIST Interactive Bicycle Simulator," ICRA 2001, Seoul, Korea, 2001.
- (5) L. W. Tsai, Robot Analysis-The mechanics of serial and parallel manipulators, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- (6) N. I. Kim, C. W. Lee and P. H. Chang, "Sliding mode control with perturbation estimation: application to motion control of parallel manipulator," Control Engineering Practice, Vol.6, No.11, p1321~1330, 1998